

Сравнительное исследование слоев 3C-SiC, выращенных на подложке 6H-SiC, методом сублимации

© Д.Б. Шустов, А.А. Лебедев[¶], С.П. Лебедев, Д.К. Нельсон, А.А. Ситникова, М.В. Заморянская

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 14 января 2013 г. Принята к печати 21 января 2013 г.)

Исследовались гетероструктуры n -3C-SiC/ n -6H-SiC, выращенные методом сублимации в вакууме на коммерческих подложках 6H-SiC компании CREE. ПЭМ исследования показали, что на подложке вырос переходной слой переменной толщины, представляющий собой смесь 3C- и 6H-политипов. На прослойке был получен слой 3C-политипа. Исследования катодолюминесценции поверхности выращенной пленки в латеральной поверхности показали, что на поверхности и приповерхностной области (порядка 100 мкм) встречаются дефекты в виде вкрапления другой фазы (6H-политипа), дефектов упаковки и двойниковых границ (разделяющих домены кубической модификации, выращенной в различных ориентациях). Различные условия роста оказывают влияние на концентрацию различных типов дефектов.

1. Введение

Карбид кремния обладает возможностью при одинаковом химическом составе кристаллизоваться как в кубическом политипе, так и в более чем двухстах гексагональных и ромбоэдрических. В гексагональных политипах постоянная решетка не отличается от постоянной решетки кубического политипа с точностью до третьего знака в направлении, перпендикулярном оси C . Поэтому он является весьма перспективным материалом для создания различных типов гетероструктур [1]. Теоретически было показано, что гетерополитипные структуры на основе SiC более перспективны, например, для изготовления транзисторов типа НЕМТ, чем соединения III-N [2]. Существует ряд экспериментальных работ, в которых гетерополитипные структуры были получены как методом сублимационной эпитаксии [3,4], так и методом CVD [5,6]. Однако к настоящему времени неизвестны работы, посвященные выращиванию структур для приборов, использующих квантово-размерные эффекты на границе политипов SiC. Скорее всего, это связано с высоким содержанием дефектов в слоях 3C-SiC и низким структурным совершенством интерфейсов между кубическим и гексагональным политипами.

Цель данной работы — провести сравнительное исследование структурного совершенства образцов 3C-SiC/6H-SiC, выращенных в различных технологических условиях.

2. Исследованные образцы

В данной работе исследовались гетероструктуры n -3C-SiC/ n -6H-SiC, выращенные методом сублимации в вакууме [3] на коммерческих подложках 6H-SiC компании CREE. На основе рентгеновских данных для дальнейших исследований были отобраны образцы двух типов:

тип А — эпитаксиальный слой 3C-SiC неоднороден, в слое наблюдаются включения гексагональной фазы;

тип В — эпитаксиальный слой 3C-SiC однороден, но имеет высокую плотность междвойниковых границ. Образцы отличались условиями роста, в частности температурой и соответственно скоростью и временем роста. Образец типа А был выращен в течение 20 мин при температуре 2100°C, второй (тип В) — в течение 10 мин при температуре 2000°C.

3. Методики исследования и обсуждение результатов

Для исследования интерфейса гетероперехода образцов использовалась просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ). Картины электронной дифракции позволяют с высокой степенью локальности определять политипную модификацию карбида кремния.

На рис. 1 показано ПЭМ-изображение поперечного сечения и соответствующая картина электронной дифракции образца типа В. Образец представляет собой структуру, состоящую из слоя карбида кремния 3C, выращенного на подложке 6H, и переходного слоя

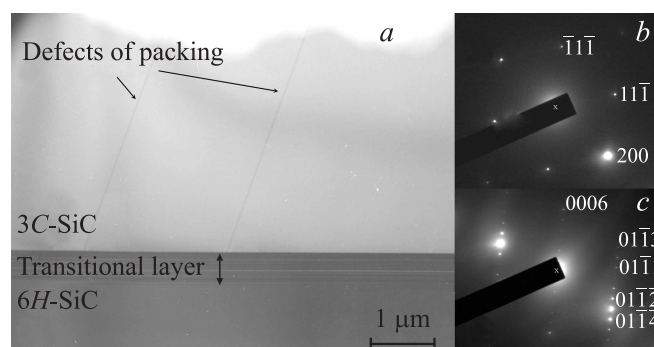


Рис. 1. Изображения скола образца (тип В) получены методом просвечивающей электронной микроскопии: *a* — область переходного слоя, *b* — микродифракция выращенного 3C-слоя, *c* — микродифракция подложки 6H-политипа.

[¶] E-mail: Shura.Lebe@mail.ioffe.ru

между ними. На рис. 1, *a* показана область переходного слоя: сверху — слой 3C-SiC (микодифракция, рис. 1, *b*), внизу — подложка 6H (микодифракция, рис. 1, *c*). На ПЭМ изображении хорошо видны дефекты упаковки (SF, stacking faults), концентрация которых в объеме эпитаксиального слоя (3C) достигает порядка 10^7 см^{-2} .

Исследование образца типа А методом ПЭМ показало, что он имеет похожую структуру: подложка 6H-политипа, переходный слой из чередующихся слоев разных политипов и выросший на нем слой 3C-политипа. Различие между образцами состоит в том, что в образце А гораздо больше дефектов упаковки, их плотность более чем 10^{10} см^{-2} и они неравномерно распределены вдоль интерфейса. Кроме того, в этом образце наблюдаются в значительном количестве включения политипа 6H.

Для характеристики однородности образца, поиска и идентификации включений использовался метод локальной катодолюминесценции (КЛ). КЛ исследования также дают возможность локально идентифицировать структурную модификацию пленки и возможных включений по спектрам излучения. Локальность метода составляет 1–3 мкм в латеральном направлении, что дает возможность обнаруживать и идентифицировать включения различной модификации и пространственные структурные дефекты (SF).

На рис. 2 показано КЛ-изображение поверхности образца типа А, полученного при облучении поверхности образца электронным пучком с энергией 10.5 кэВ. При такой энергии первичного электронного пучка катодолюминесценция генерируется в основном в слое толщиной 100 мкм от поверхности. Спектры КЛ, полученные с различных областей поверхности, приведены на рис. 3. 3C-политип характеризуется красным излучением, спектр, соответствующий этой области, представлен на рис. 3, *b*. В спектре наблюдается широкая полоса с максимумом излучения 2.1 эВ. Природа этой полосы связана с излучением донорно-акцепторных пар Al-N в 3C-SiC [7]. Энергия этого излучения меньше, чем ширина запрещенной зоны 3C (ширина запрещенной зоны 3C-SiC — 2.36 эВ) [8]. На образце было обнаружено множество случайно располагающихся включений с голубой люминесценцией. Спектр излучения этих включений (рис. 3, *d*) аналогичен спектру излучения подложки (рис. 3, *a*). Природа этой полосы излучения так же связана с донорно-акцепторной рекомбинацией Al-N, но для политипа 6H E_g 6H-SiC равна 3.02 эВ [9]. На некоторых образцах на краю включений 6H-SiC наблюдались области с преобладающей КЛ в зеленом диапазоне спектра (рис. 3, *c*).

Данный спектр соответствует хорошо известной в 6H „дефектной люминесценции“ [10]. Обычно появление данной люминесценции связывается с наличием структурных дефектов, но природа ее до конца не изучена. Нужно отдельно отметить, что ни один из спектров при

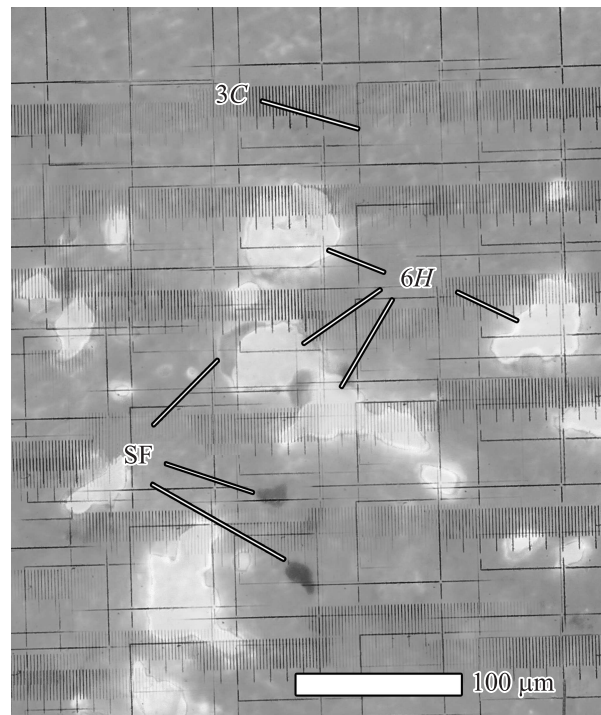


Рис. 2. Изображение, полученное методом катодолюминесценции (КЛ), поверхности образца типа А в планарной плоскости. Темные области соответствуют излучению слоя 3C-SiC (красная КЛ), светлые области — включения 6H-SiC модификации (синяя КЛ), SF — обозначены области с преобладающей зеленой КЛ.

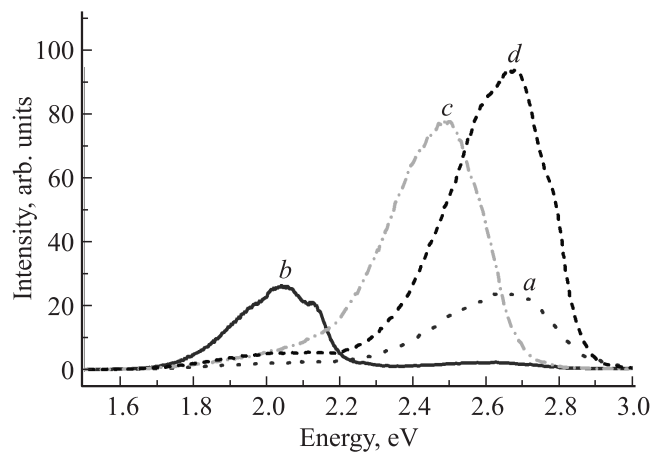


Рис. 3. Спектры катодолюминесценции, полученные на образце типа А: *a* (точки) — подложка 6H-SiC, *b* (сплошная линия) — спектр 3C-SiC, *c* (штрихпунктир) — область скопления дефектов упаковки, *d* (пунктир) — включения 6H-политипа.

комнатной температуре не содержит краевых полос излучения, которые соответствуют переходам зона–зона, свободным и связанным экситонами.

Получение катодолюминесцентных изображений и спектров КЛ при различной энергии электронного пучка позволяет менять область генерации КЛ до нескольких

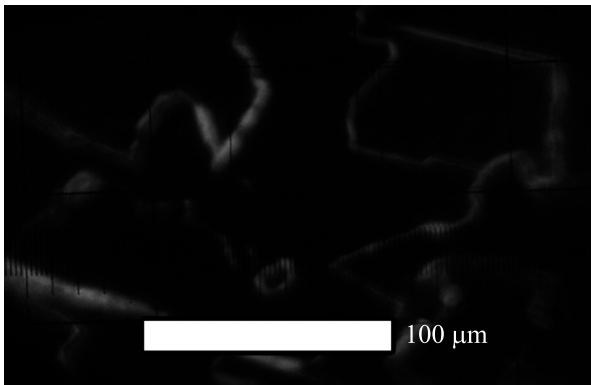


Рис. 4. Изображение поверхности образца типа В, полученное методом катодолуминоесценции. Более яркие (светлые) линии соответствуют двойничковым границам.

микрон. Это позволило в образце типа А наблюдать существование включений другой структурной модификации, не выходящих на поверхность образца. Расчет области генерации катодолуминоесценции при различных энергиях электронного зонда позволяет оценить глубину залегания включений другого поли типа карбида кремния в пленке. Включения, обнаруженные методом КЛ, залегают на глубине 150–200 нм. Вклад излучения, соответствующего 6H-политипу, увеличивается с увеличением глубины проникновения электронов (см. подробнее [11]).

КЛ-изображение поверхности образца типа В представлено на рис. 4. Полученные спектры КЛ соответствуют 3C-политипу карбида кремния (спектр — рис. 5, *b*), что доказывает отсутствие включений другого поли типа или областей с большим содержанием дефектов упаковки. Однако поверхность этого образца не однородная, наблюдаются яркие полосы на КЛ-изображении, они же видны в оптический микроскоп как трещины или уступы. Предположительно, это двойничковые границы — границы доменов кубического поли типа, имеющих различную кристаллографическую ориентацию. Также было проведено исследование низкотемпературных спектров фотолюминесценции обоих типов образцов при температуре жидкого гелия ($T = 2\text{ K}$).

В образце типа А люминесценция 3C-SiC более яркая и полосы донорно-акцепторной рекомбинации более отчетливые и узкие, чем в образце типа В.

В спектре структур типа А наблюдался набор линий в области экситонных переходов (рис. 6). Данные линии были смещены на $\sim 19\text{ мЭВ}$ в длинноволновую сторону по сравнению с известными линиями связанного экситона в объемном 3C-SiC (рис. 7) [12]. Можно предположить, что релаксация напряжений при гетероэпитаксии в образцах типа А происходит за счет образования включений поли типа 6H-SiC. В результате кубическая часть эпитаксиального слоя обладает большим структурным совершенством, что проявляется и на спектрах ФЛ и КЛ. В образцах типа В ростовые напряжения

релаксируют за счет образования двойничковых границ и SF. В результате слой 3C в целом обладает худшим структурным совершенством и из-за большого числа дефектов имеет худшие оптические свойства.

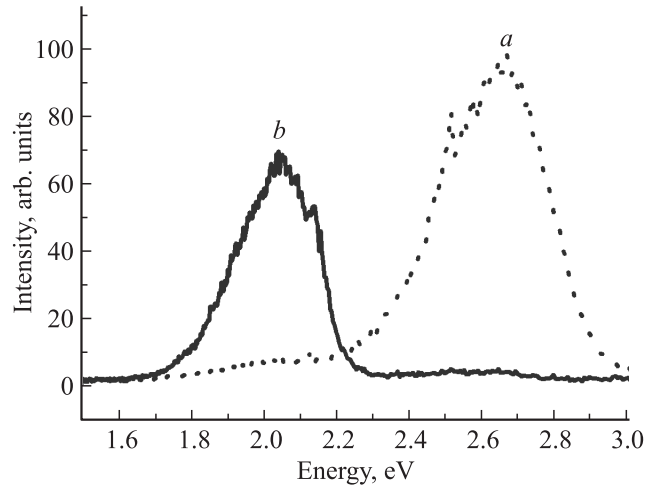


Рис. 5. Спектры катодолуминоесценции образца типа В: *b* (непрерывная линия) — выращенный 3C-слой, *a* (линия из точек) — подложка.

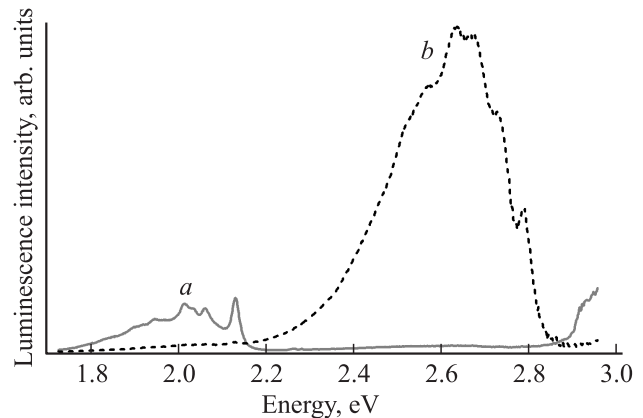


Рис. 6. Спектр фотолюминесценции исследованных образцов при 2 К: *a* — образец типа А, *b* — образец типа В.

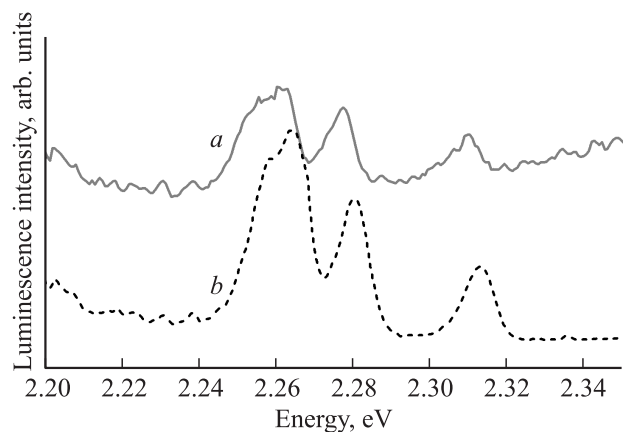


Рис. 7. Часть спектра в области экситонных переходов: *a* — образец типа А, *b* — спектр из работы [12].

4. Заключение

В образцах обоих типов обнаружен переходный слой между подложкой 6H-SiC и 3C-пленкой. Он представляет собой смесь политипов 3C и 6H, имеет переменную толщину. В образце типа В переходный слой тоньше, дефектов упаковки очень мало. Но массив пленки состоит из доменов кубического политипа, выращенного в различных ориентациях, что привело к образованию двойниковых границ и макроскопическим неровностям на поверхности.

Наличие переходного слоя, по-видимому, мешает проявлению квантово-размерных эффектов на гетеропереходе 3C-SiC/6H-SiC и не позволяет создавать приборы типа НЕМТ транзистора на основе гетерополитипных структур. Следует также отметить, что толщина переходного слоя, так же как и общая концентрация дефектов, снижалась с увеличением однородности слоя 3C-SiC (с исчезновением включений гексагональной фазы). Таким образом, можно предположить, что исчезновение переходного слоя будет наблюдаться в гетероструктурах 3C-SiC/6H-SiC, где слой кубического политипа будет состоять из одного или нескольких двойников.

Авторы благодарны А.С. Трегубовой и М.П. Щеглову за проведение рентгено-топографических исследований данных образцов.

Работа частично выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-02-00662а.

Список литературы

- [1] A.A. Lebedev. *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 21, R17 (2006).
- [2] V.M. Polyakov, F. Schwierz. *J. Appl. Phys.*, **98**, 023 709 (2005).
- [3] А.А. Лебедев, Г.Н. Мосина, И.П. Никитина, Н.С. Савкина, Л.М. Сорокин, А.С. Трегубова. *Письма ЖТФ*, **27** (24), 57 (2001).
- [4] А.А. Лебедев, А.М. Стрельчук, Д.В. Давыдов, Н.С. Савкина, А.Н. Кузнецов, Л.М. Сорокин. *Письма ЖТФ*, **28** (18), 89 (2002).
- [5] M.S. Chandrashekhana, C.I. Thomas, Jie Li, M.G. Spenser. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 033 503 (2007).
- [6] Jie Li, M.S. Chandrashekhana, J.J. Parks, D.C. Ralph, M.G. Spenser. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 162 115 (2009).
- [7] W.J. Choyke, L. Patrick. *Phys. Rev. B*, **3**, 4959 (1970).
- [8] M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur. Eds. *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe* (John Wiley & Sons, Inc., 2001).
- [9] M. Ikeda, H. Matsunami, T. Tanaka. *Phys. Rev. B*, **22** (6), 2842 (1980).
- [10] А.Н. Андреев, М.М. Аникин, Н.К. Полетаев, А.М. Стрельчук, А.Л. Сыркин, В.Е. Челноков, *ФТП*, **28** (5), 729 (1994).
- [11] D.V. Shustov, A.A. Lebedev, S.P. Lebedev, A.A. Sitnikova, M.V. Zamoryanskaya. *Abstracts 11th Int. Conf. on Atomically Controlled Surface, Interfaces and Microstructures* (St. Petersburg, 3–7 October 2011) p. 284.

- [12] А.А. Лебедев, П.Л. Абрамов, Е.В. Богданова, С.П. Лебедев, Д.К. Нельсон, Б.С. Разбирин, А.С. Трегубова. *Письма ЖТФ*, **36**, 32 (2010).

Редактор Т.А. Полянская

The comparative research of 3C-Si raised on 6H-SiC substrate by sublimation method

D.B. Shustov, A.A. Lebedev, S.P. Lebedev, D.K. Nelson, A.A. Sitnikova, M.V. Zamoryanskaya

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Science,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Heterostructure of *n*-3C-SiC layers grown by vacuum sublimation technique on CREE *n*-6H-SiC substrates were studied by cathodoluminescence (CL) and transmission electron microscopy (TEM). According to TEM measurements there intermediate layer was found between 3C-layer and 6H-substrate. Intermediate layer is an irregular sequence of 3C/6H thin layers with non-uniform spatial distribution. CL shows the presence of defects (6H-inclusions, stacking faults, twin-boundaries) in the 3C-surface layer ($\sim 100\mu\text{m}$). Variation of growth parameters leads to changes in density of different defects types.